

Métaux et alliages non ferreux

Chapitre 11

Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Métaux non ferreux

- **Introduction**
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Métaux non ferreux

- Aciers, 90 % des matériaux métalliques;
- *Aluminium, magnésium, cuivre, titane, zinc, plomb etc.;*
- *Métaux réfractaires (T_f élevée) : niobium, molybdène, tungstène, tantale;*
- *Superalliages à base de nickel ou de cobalt.*
- **Avantages des métaux non ferreux :**
 - *Grande résistance à la corrosion;*
 - *Grande facilité de formage, de travail à l'outil et à la forge;*
 - *Meilleur fini de surface;*
 - *Meilleures propriétés mécaniques et physiques que les métaux ferreux (à poids égal).*

$$\text{Résistance Spécifique} = \frac{\text{Résistance}}{\text{Densité}}$$

Métaux non ferreux

TABLE 14-1 ■ Specific strength and cost of nonferrous alloys, steels, and polymer composites

Metal	Density		Tensile Strength (psi)	Specific Strength (in.)	Cost per lb (\$) ^c
	g/cm ³	(lb/in. ³)			
Aluminum	2.70	(0.097)	83,000	8.6×10^5	0.60
Beryllium	1.85	(0.067)	55,000	8.2×10^5	350.00
Copper	8.93	(0.322)	150,000	4.7×10^5	0.71
Lead	11.36	(0.410)	10,000	0.2×10^5	0.45
Magnesium	1.74	(0.063)	55,000	8.7×10^5	1.50
Nickel	8.90	(0.321)	180,000	5.6×10^5	4.10
Titanium	4.51	(0.163)	160,000	9.8×10^5	4.00
Tungsten	19.25	(0.695)	150,000	2.2×10^5	4.00
Zinc	7.13	(0.257)	75,000	2.9×10^5	0.40
Steels	~7.87	(0.284)	200,000	7.0×10^5	0.10
Aramid/epoxy (Kevlar, vol. fraction of fibers 0.6, longitudinal tension)	1.4	(0.05)	200,000	4.0×10^6	—
Aramid/epoxy (Kevlar, vol. fraction of fibers 0.6, transverse tension) ^a	1.4	(0.05)	4,300	0.86×10^4	—
Glass/epoxy (Vol. fraction of E-glass fibers 0.6, longitudinal tension) ^b	2.1	(0.075)	150,000	2.0×10^6	—
Glass/epoxy (Vol. fraction of E-glass fibers 0.6, transverse tension)	2.1	(0.075)	7,000	9.3×10^4	—

^aData for composites from Harper, C.A., Handbook of Materials Product Design, 3rd ed. 2001: McGraw-Hill. Commodity composites are relatively inexpensive; high-performance composites are expensive.
^bProperties of composites are highly anisotropic. This is taken care of during fabrication though.
^cCosts based on average prices for the years 1998 to 2002.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

MEC-200 – Technologie des matériaux Alliages non ferreux 5

Session 11

Exercice

- Un câble d'acier de 0.5 cm de diamètre a une limite d'élasticité de 70.000 Psi. La densité de l'acier est de 7.87 g/cm³. Déterminez la charge maximale que ce câble d'acier peut supporter, le diamètre d'un câble d'alliage Al, Mn (3004-H 18) nécessaire pour supporter la même charge que l'acier, le poids par pied de câble d'acier et de câble d'alliage d'aluminium.

Données : limite d'élasticité de l'alliage d'aluminium : 36.000 Psi.
densité de l'alliage 2.7 g/cm³.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

MEC-200 – Technologie des matériaux Alliages non ferreux 6

Session 11

Métaux non ferreux

- Aciers, 90 % des matériaux métalliques;
- Aluminium, magnésium, cuivre, titane, zinc, plomb etc.;
- Métaux réfractaires (T_f élevée) : niobium, molybdène, tungstène, tantale;
- Superalliages à base de nickel ou de cobalt.
- Avantages des métaux non ferreux :
 - Grande résistance à la corrosion;
 - Grande facilité de formage, de travail à l'outil et à la forge;
 - Meilleur fini de surface;
 - Meilleures propriétés mécaniques et physiques que les métaux ferreux (à poids égal).
- Désavantage :
 - Plus coûteux que les métaux ferreux.

MEC-200 – Technologie des matériaux Alliages non ferreux 7

Session 11

Métaux non ferreux

TABLE 14-1 ■ Specific strength and cost of nonferrous alloys, steels, and polymer composites

Metal	Density		Tensile Strength (psi)	Specific Strength (in.)	Cost per lb (\$) ^c
	g/cm ³	(lb/in. ³)			
Aluminum	2.70	(0.097)	83,000	8.6×10^5	0.60
Beryllium	1.85	(0.067)	55,000	8.2×10^5	350.00
Copper	8.93	(0.322)	150,000	4.7×10^5	0.71
Lead	11.36	(0.410)	10,000	0.2×10^5	0.45
Magnesium	1.74	(0.063)	55,000	8.7×10^5	1.50
Nickel	8.90	(0.321)	180,000	5.6×10^5	4.10
Titanium	4.51	(0.163)	160,000	9.8×10^5	4.00
Tungsten	19.25	(0.695)	150,000	2.2×10^5	4.00
Zinc	7.13	(0.257)	75,000	2.9×10^5	0.40
Steels	~7.87	(0.284)	200,000	7.0×10^5	0.10
Aramid/epoxy (Kevlar, vol. fraction of fibers 0.6, longitudinal tension)	1.4	(0.05)	200,000	4.0×10^6	—
Aramid/epoxy (Kevlar, vol. fraction of fibers 0.6, transverse tension) ^a	1.4	(0.05)	4,300	0.86×10^4	—
Glass/epoxy (Vol. fraction of E-glass fibers 0.6, longitudinal tension) ^b	2.1	(0.075)	150,000	2.0×10^6	—
Glass/epoxy (Vol. fraction of E-glass fibers 0.6, transverse tension)	2.1	(0.075)	7,000	9.3×10^4	—

^aData for composites from Harper, C.A., Handbook of Materials Product Design, 3rd ed. 2001: McGraw-Hill. Commodity composites are relatively inexpensive; high-performance composites are expensive.

^bProperties of composites are highly anisotropic. This is taken care of during fabrication though.

^cCosts based on average prices for the years 1998 to 2002.

Source: Essentials of Materials Science and Engineering, D.R. Askeland, P.P. Fulay

MEC-200 – Technologie des matériaux Alliages non ferreux 8

Session 11

Alliages non ferreux

Coulées (de fonderie)

- Fragiles (difficulté ou impossibilité de mise en forme);
- Il faut de la coulabilité, bonne aptitude à remplir la cavité;
- Absence de fissures lors du retrait;
- Bon projet pour éviter les gradients de microstructure.



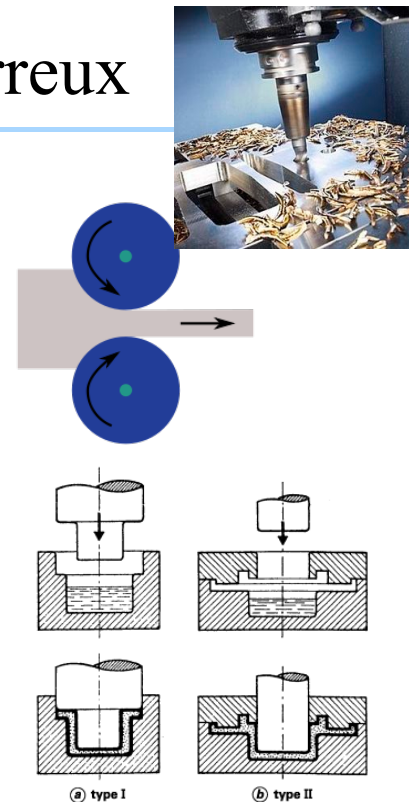
Corroyage

Alliages non ferreux

Coulées (de fonderie)

Corroyage

- Extrusion
- Laminage
- Forgeage
- Usinage



Métaux non ferreux

- Introduction
- **Alliages d'aluminium**
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Aluminium et ses alliages

- Production = 2 % de la production des aciers mais seconde position en production des métaux.
- Légers
 - 2.7 g/cm³ contre 7.9 g/cm³ aciers
- Bonne résistance à la corrosion
 - Formation d'une couche de Al₂O₃
- Conductibilité électrique élevée
 - 62 % celle du cuivre
- Propriétés mécaniques
 - Faibles mais améliorées par :
 - Écrouissage : 1000 (Al pur), 3000 (Al-Mn), 5000 (Al-Mg)
 - Durcissement structural : 2000 (Al-Cu et Al-Cu-Mg); 6000 (Al-Mg-si), 7000 (Al-Zn-Mg et Al-Mg-Cu).
- Mise en forme
 - Tf basse (660°C) => fonderie
 - Très ductile => bonne capacité de mise en forme par déformation plastique - corroyage

Principaux éléments d'alliages de l'aluminium

Éléments

Effets

Cuivre

Augmente la résistance mécanique.

Manganèse

Augmente la résistance mécanique et modifie la granulométrie.

Magnésium et silicium augmentent la résistance à la corrosion atmosphérique.

Zinc

Augmente résistance mécanique.

Alliages d'aluminium

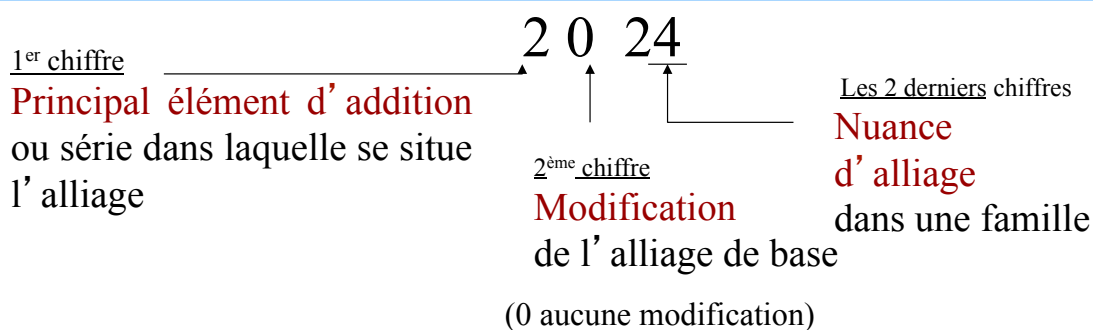
Corroyage

- Trempants :
 - Propriétés mécaniques améliorées par traitements thermiques.
- Non trempants :
 - Propriétés mécaniques améliorées par écrouissage, durcissement par précipitation.

Désignation des états métallurgiques

F :	état brut de fabrication
O :	état recuit et recristallisé
H :	état écroui
HIX :	écrouissage seulement (le dernier chiffre, X, indique le degré d'écrouissage)
	H11 : nuance la moins dure
	H12 : nuance 1/4 dur
	H14 : nuance 1/2 dur
	H16 : nuance 3/4 dur
	H18 : nuance 4/4 dur
	H19 : nuance extra-dur
H2X :	écrouissage suivi d'un recuit de restauration (X varie de 2 à 9)
H3X :	écrouissage suivi d'une stabilisation (X varie de 2 à 9)
T :	état durci par trempe et vieillissement (durcissement structural)
T1 :	trempe après mise en forme à chaud et vieillissement naturel (à la température ambiante)
T3 :	mise en solution, trempe, écrouissage et vieillissement naturel
T4 :	comme T3, mais sans écrouissage
T5 :	comme T1, mais vieillissement accéléré (à une température supérieure à la température ambiante)
T6 :	comme T4, mais vieillissement accéléré
T7 :	comme T6, mais survieilli
T8 :	comme T3, mais vieillissement accéléré
T9 :	comme T6 et suivi d'un écrouissage

Classification : Al de corroyage



La série 1000 (aluminium pur) a un système différent

10XX : 0.XX pourcentage de pureté de Al au dessus de 99 %

Ex : 1060 : Aluminium pur à 99.60 %

Aluminium de corroyage

Série	Éléments d'addition principal
1000	Aluminium pur (99%)
2000	Cuivre
3000	Manganèse
4000	Silicium
5000	Magnésium
6000	Magnésium + silicium
7000	Zinc
8000	Autres éléments

Alliages d'aluminium de corroyage

- Alliages sans durcissement structural

- Propriétés mécaniques :
 - A % élevée (bonne ductilité),
 - R_m et dureté basses.
- Séries présentant ces propriétés :
 - Aluminium pur : 1000,
 - Al-Mn : 3000,
 - Al-Mg : 5000 (généralement moins de 4 % de Mg).



- Alliages à durcissement structural

- Propriétés mécaniques pouvant être augmentées par traitement thermique (voir cours #9);
- Séries présentant ces propriétés :
 - Al-Cu et Al-Cu-Mg : 2000,
 - Al-Mg-Si : 6000,
 - Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu : 7000.

Alliages sans durcissement structural

Alliage* Composition moyenne (%)	État	$R_{e0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Résistance à la fatigue** (MPa à 5×10^8 cycles)	Principaux domaines d'utilisation
1060 Al \geq 99,6	O H14 H18	28 90 125	70 110 130	40 12 6	— — —	Industries chimique, alimentaire et cryogénique ; citernes
1100 Al \geq 99,0 Fe + Si < 1	O H14 H18	35 90 130	80 130 150	35 9 6	30 50 60	Produits courants n'exigeant pas de propriétés élevées ; revêtements de bâtiments (très bonne aptitude à la fabrication)
3003 1,2 Mn–0,12 Cu	O H14 H18	40 145 185	110 155 200	30 8 4	45 62 70	Mêmes utilisations que 1100, mais avec de meilleures propriétés mécaniques
3004 1,2 Mn–1,0 Mg	O H14 H18	70 200 250	180 245 285	22 9 4	65 110 115	
5050 1,4 Mg	O H34 H38	55 165 200	145 190 220	26 8 6	60 110 120	Construction de bâtiments ; tuyauterie
5052 2,5 Mg–0,25 Cr	O H34 H38	90 210 255	190 265 280	25 10 7	110 120 135	Tuyauterie ; chaudronnerie
5454 2,7 Mg–0,8 Mn–0,12 Cr	O H34 H38	115 240 275	240 300 340	22 10 7	135 140 150	Structures soudées ; tuyauterie (utilisation en atmosphères marines)

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Série 1000

- Pureté d'au moins 99 %;
- Propriétés mécaniques faibles;
- Peuvent être améliorées par écrouissage;
- Facilement mis en forme;
- Conducteurs électriques.

Alliages Al-Mg : série 5000

- Alliages de corroyage contenant : moins de 4 % de Mg
- Pas sensible au durcissement structural --> écrouissage

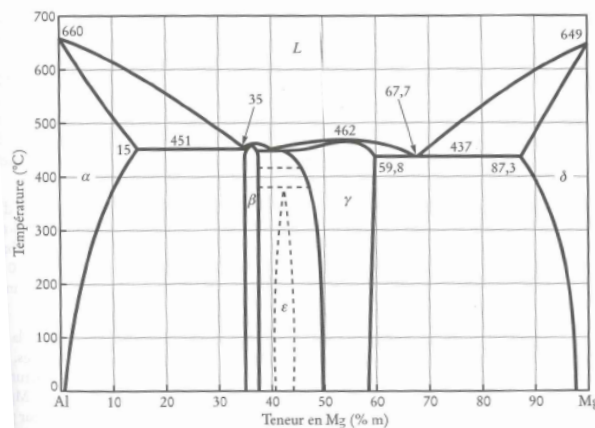


Figure 11.2 Diagramme d'équilibre Al-Mg.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 21

Session 11

Alliages Al-Mg : série 5000

- Alliages de corroyage contenant : moins de 4 % de Mg
- Pas sensible au durcissement structural --> écrouissage
- **Propriétés :**
 - Rm moyenne, améliorée par écrouissage,
 - Grande aptitudes aux déformations,
 - à chaud : filage, forgeage,
 - à froid (état recuit O) : emboutissage, pliage.
 - Excellente soudabilité,
 - Très bonne résistance à la corrosion, améliorée par anodisation,
 - Bon fini de surface après polissage.
- **Utilisations :** Cas du 5052 H32 (2,5 Mg; 0,25Cr)
 - Canalisation d'alimentation en carburant et en lubrifiant des aéronefs,
 - Réservoirs de carburant,
 - Rivets et fils.

Alliages à durcissement structural

Alliage Composition moyenne (%)	État	$R_{0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Résistance à la fatigue* (MPa à 5×10^8 cycles)	Principaux domaines d'utilisation
2014 4,4 Cu-0,5 Mg-0,8 Mn-0,8 Si	O	100	200	20	90	Structures d'avions ; châssis de camions
	T4	290	420	18	140	
	T6	430	480	12	125	
2024 4,4 Cu-1,5 Mg-0,6 Mn	O	100	200	20	90	Aéronautique ; charpentes ; visserie ; articles de sport
	T4	320	460	18	140	
	T6	390	475	10	125	
6061 1,0 Mg-0,6 Si-0,2 Cr-0,3 Cu	O	55	125	25	50	Carrosseries (autos et camions) ; structures ; pylônes ; tubes
	T4	150	245	22	90	
	T6	275	410	17	100	
6070 0,8 Mg-1,4 Si-0,7 Mn-0,3 Cu	O	70	145	20	65	Structures soudées ; construction navale
	T6	365	400	12	100	
7005 4,5 Zn-1,4 Mg-0,12 Cr-0,4 Mn-0,15 Zr	O	85	200	20	–	Matériel de transport routier et ferroviaire ; produits filés
	T6	295	360	13	155	
7075 5,6 Zn-2,5 Mg-1,6 Cu-0,3 Cr	O	105	230	17	–	Aéronautique ; armement ; boulonnerie ; bâtons de ski
	T6	500	570	11	160	

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Alliages d' Al-Cu Séries 2000 : ex 2024

- Propriétés :
 - Densité : 2.82 g/cm³,
 - Dureté : 45-135 HRB,
 - Charge de rupture : 469 Mpa (68ksi) Cas du 2024-T4).
- Utilisation- aéronautique
 - Pièces structurales rivetées.
- Autres
 - Roues des camions,
 - Vis.
- Avantage :
 - Léger,
 - Excellente propriété mécanique,
 - Mise en forme aisée.
- Précautions
 - Éviter des défauts sur les revêtements et les égratignures,
 - Attention au vieillissement naturel (2024).
- Désavantages :
 - Mauvaise résistance à la corrosion par rapport à la série 6000,
 - Mauvaise soudabilité.

- Propriétés :
 - Densité : 2.7 g/cm³,
 - Dureté : 45 - 95 HRB,
 - Charge de rupture : 172 Mpa (25ksi) Cas du 6061-T4).
- Utilisation en aéronautique :
 - pièces structurales soudées.
- Avantage :
 - Propriétés mécaniques moyennes,
 - Mise en forme à chaud aisée,
 - **Bonne soudabilité**,
 - Bonne résistance à la corrosion atmosphérique.
- Autres :
 - wagons de chemin de fer,
 - meubles,
 - pipelines.
- Désavantage :
 - Résistance limitée à chaud (150°C).

- Durcissement de cet alliage dû à la formation du composé Mg₂Si.
- L'ajout de Cu dans ces alliages améliore leurs propriétés mécaniques et sa teneur est limitée à 0.5 % car il diminue la résistance à la corrosion.

Alliages de fonderie

- Propriétés recherchées :
 - Coulabilité (aptitude à remplir la cavité),
 - Absence de fissures lors du retrait,
 - Bonne répartition de la porosité.
- Alliages d'aluminium intéressants :
 - Basse température de fusion,
 - Teneur forte en élément d'alliage, on aura donc plus d'eutectique.
- Choix du moule important :
 - Design,
 - Transfert de chaleur,
 - Types de moules, métalliques ou sable?
 - Épaisseur de pièce.

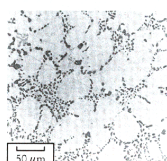
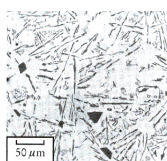
Alliages d'aluminium de fonderie

Tableau 11.6 Désignations des alliages d'aluminium de fonderie (Aluminum Association)

Alliage	Série
Al commerc. pur	100.0
Al-Cu	200.0
Al-Si-Mg et Al-Si-Cu	300.0
Al-Si	400.0
Al-Mg	500.0
Al-Zn	700.0
Al-Sn	800.0

Alliages de fonderie

- Al-Si (s. 400); Al-Si-Mg et Al-Si-Cu (s. 300)
 - % Si de l'ordre de 5 à 20 %;
 - bonne coulabilité et bonne résistance à la corrosion;
 - + **Mg** : améliore la sensibilité aux traitements thermiques;
 - Al-Si-Cu (≈ 12.7 Si) : **α faible** : (pistons ou culasses des moteurs à combustions).



Globulaire
Al-Si + Na

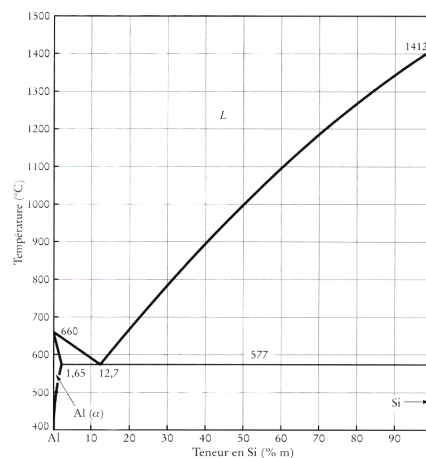


Figure 11.3 Diagramme d'équilibre Al-Si.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Alliages de fonderie

- Al-Cu (série 200)
 - **mauvaise coulabilité** (Tf de Cu élevée; améliorer avec Si)
- Al-Mg (s. 500)
 - Excellente résistance à la corrosion
 - atmosphère marine
 - eau de mer
 - **Coulabilité médiocre**
- Al-Zn-Mg (s. 700)
 - Faible coulabilité (porosité)
 - **Auto-trempant : vieillissement naturel** (1 à 2 mois)

Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- **Alliages de cuivre**
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Le cuivre et ses alliages

Cuivre pur (copper): un des premiers métaux utilisés par les hommes

- Excellente conductibilité électrique, utilisé pour conducteur, transformateur;
- CFC, très ductile, facile à conformer par déformation plastique et difficile à usiner;
- Peut être écroui à volonté;
- Très résistant à la corrosion (atmosphère ambiante, eau de mer);
- Applications : tuyaux à eau, plomberie, pompes et vannes etc.

Alliages : Laiton (Cu-Zn); Bronze (Cu-Sn), Cu-Al, Cu-Ni, Cu-Be, Cu-Zn,Ni

- Résistance à la corrosion améliorée;
- Ne peuvent pas être durcis par traitement thermiques;
- Écrouissable;
- Applications : bijoux, douilles des cartouches, radiateurs d'automobile, instruments de musique.

Les principaux alliages de cuivre

- Les laitons (brass)

- *Alliage Cu et Zn*

- *Moins résistant que le Bronze (Cu - Sn),*
 - *Bonne résistance à la corrosion,*
 - *< 40 % Zn.*

- *Utilisations*

- *Applications nécessitant :*
 - *Placage,*
 - *Emboutissage.*



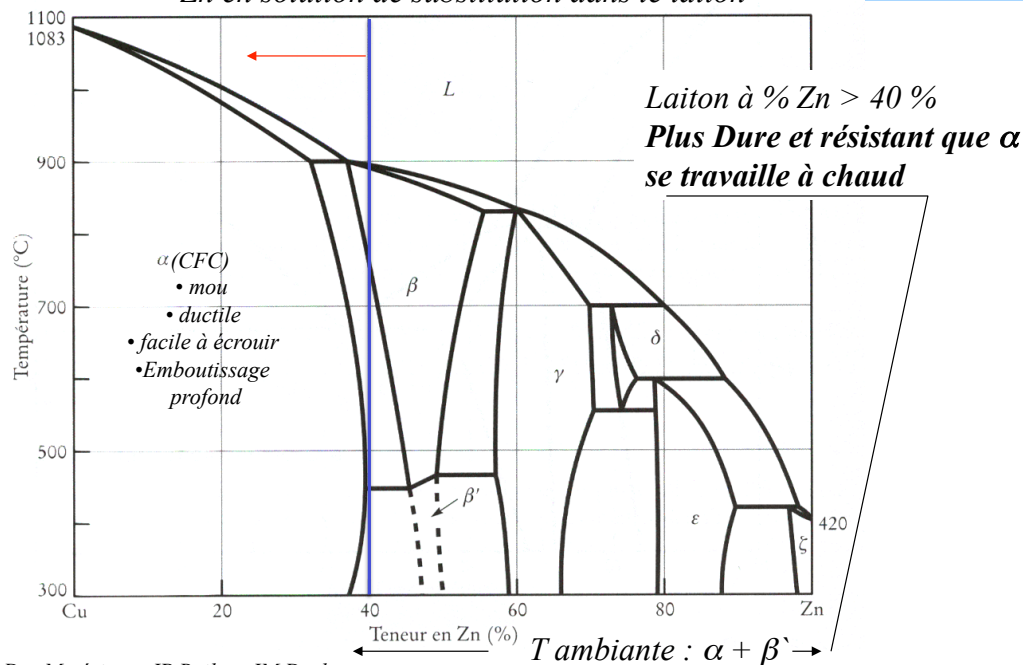
Les laitons

- *Peuvent être usinés;*
- *Peuvent être plaqués par électrolyse;*
- *Prix inférieur au cuivre;*
- *Bonne résistance à corrosion mais peuvent souffrir une dézincification;*
- *On peut améliorer la résistance à la corrosion en additionnant 1 % d'étain.*



Diagramme d'équilibre Cu-Zn

Zn en solution de substitution dans le laiton



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 35

Session 11

Micrographies de laiton

Plus le laiton contient de Zn, plus la couleur passe du rouge au jaune.

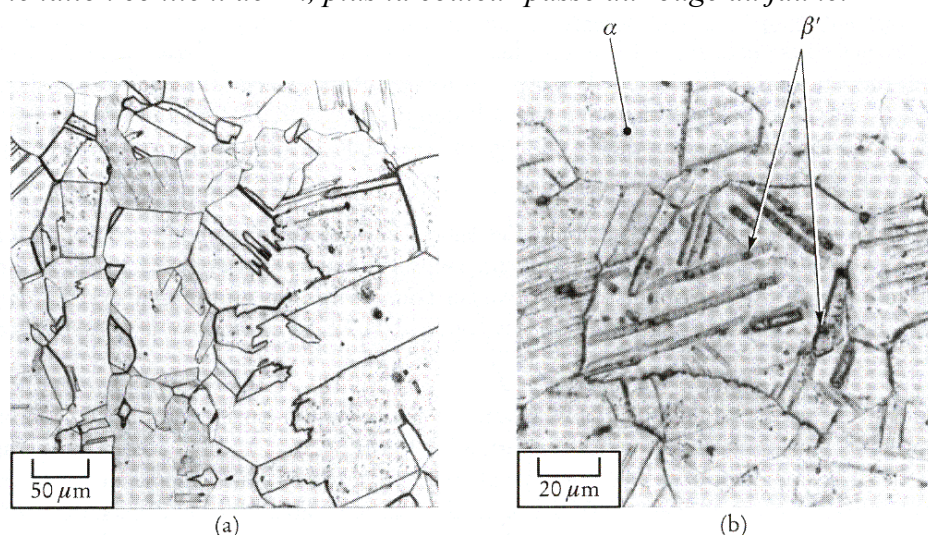


Figure 11.7 Micrographie : a) d'un laiton monphasé α (Cu-30 % Zn) ; b) d'un laiton α - β' (Cu-40 % Zn).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 36

Session 11

R_m, R_e et A % des alliages Cu-Zn

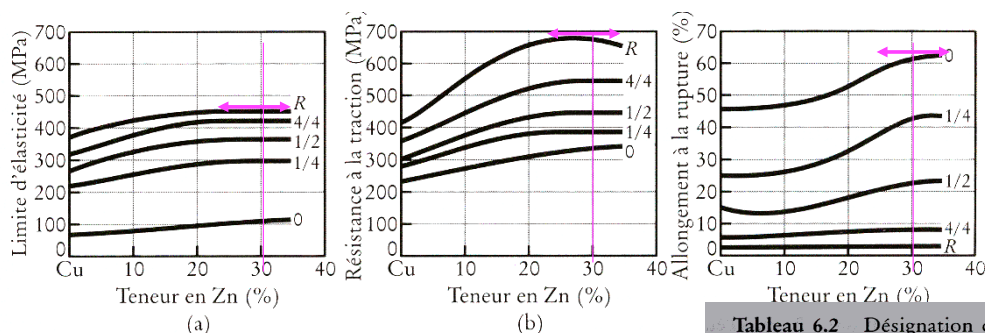


Figure 11.8 Variation des propriétés mécaniques, mesurées en traction, en fonction de la teneur en zinc dans divers états de durcissement (0, 1/2 dur, 4/4 dur et qualité ressort) : a) limite d'élasticité ; b) résistance à la traction ; c) allongement à la rupture.

R_e
 R_m
 $A\%$

Max à 30% Zn ---
 → Laiton 70/30 (70%Cu 30%Zn)

Tableau 6.2 Désignation des états écrouis dans le cas des alliages de cuivre

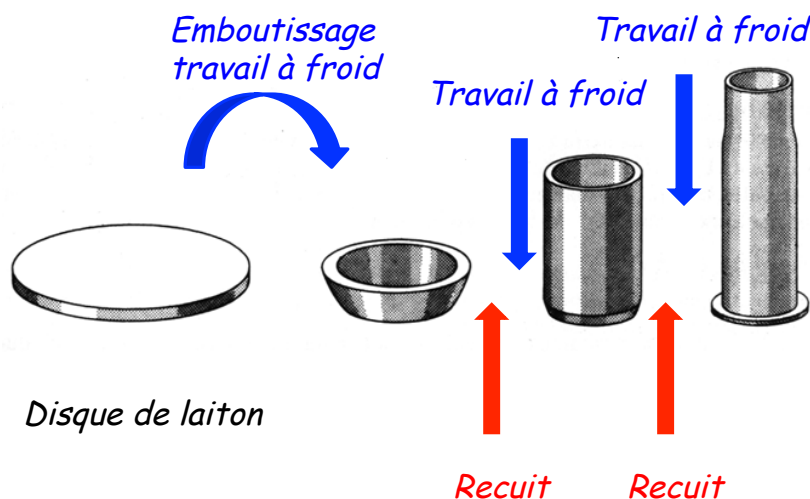
État	Écrouissage (%)	
	plats	fils
Recuit	0	0
1/4 dur	11	21
1/2 dur	21	37
3/4 dur	30	50
Dur	37	60
Extra-dur	50	75
Ressort	60	84
Ressort extra-dur	69	90

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux

Travail à froid, restauration et recristallisation : application



Fabrication des cartouches Norma à l'usine d'Amotfors en Suède : Utube

Les principaux alliages de cuivre

- Les bronzes (bronze)

- *Alliage Cu et (Sn ou Al ou Si ou Ni)*
 - Plus résistant que le laiton (Cu - Zn),
 - Bonne résistance à la corrosion.
- *Utilisations*
 - Applications nécessitant :
 - bonne résistance à la corrosion,
 - bonne propriétés de traction.



Diagramme d'équilibre Cu-Sn

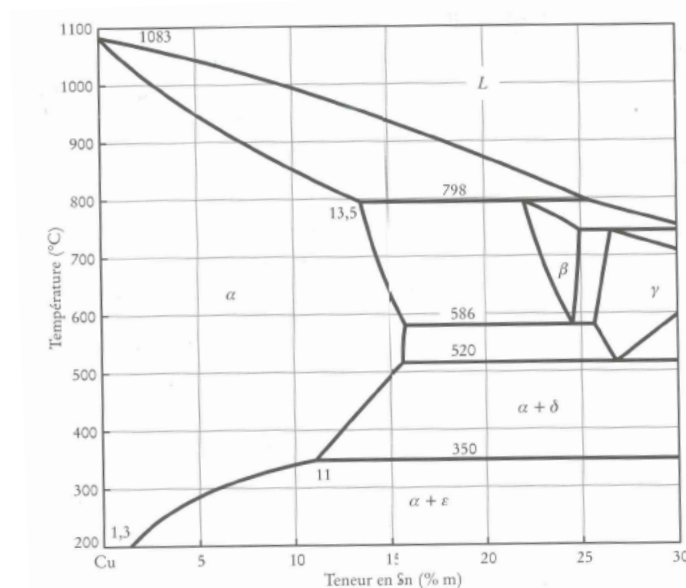


Figure 11.9 Diagramme d'équilibre Cu-Sn.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Les principaux alliages de cuivre

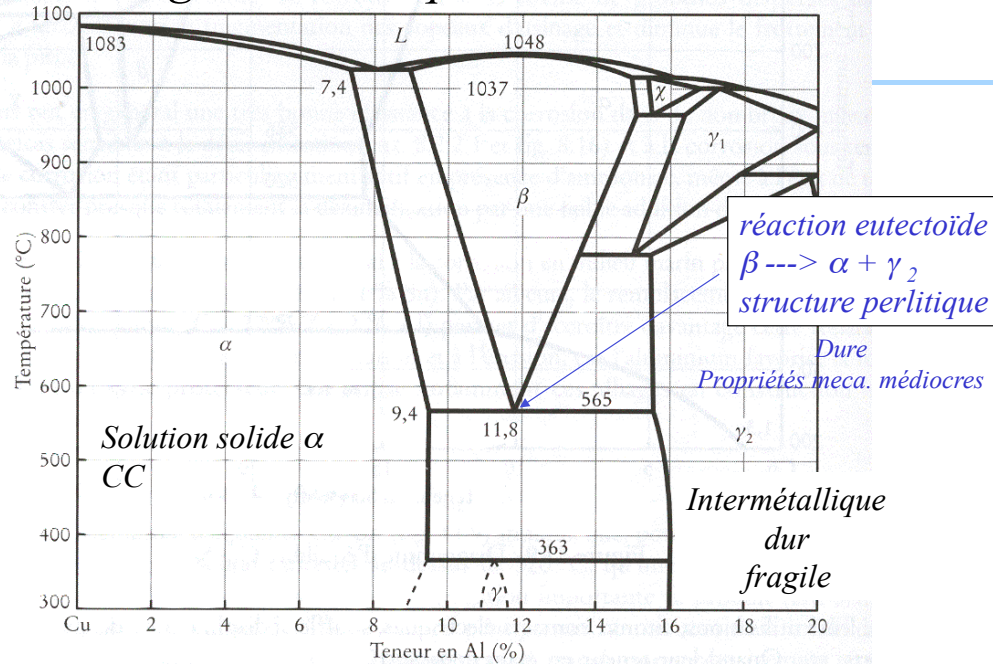
- Contacts électriques, disques d'embrayage et ressorts;
- Si + 10 % de Sn, impossible de les mettre en forme par déformation plastique mais ils peuvent être usinés;
- Alliage de fonderie 16 % Sn et Zn et Pb.



Autres alliages de Cu

- *Les cupro-aluminiums (Cu-Al)*
 - Bonne résistance à la corrosion (Al_2O_3),
 - Utilisations (5 à 8 % Al) :
 - condensateurs,
 - échangeurs de chaleur,
 - organes de pompe et de quincaillerie marine.

Diagramme d'équilibre Cu-Al



β refroidit rapidement (trempe à eau) → martensite

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

ME

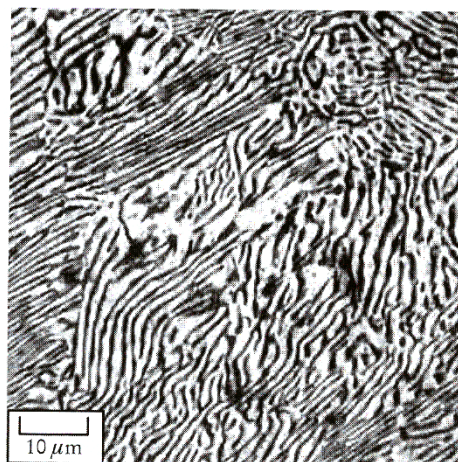
- moins dure que la perlite

- Propriétés améliorées par un revenu vers 500°C

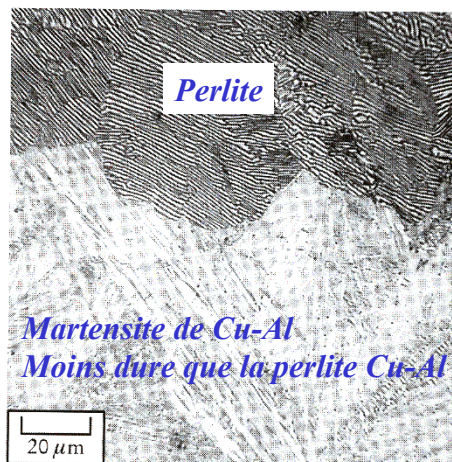
Structures des alliages Cu-11.5Al

Refroidissement au four + trempe à eau
→ Perlite + martensite

Refroidissement lent → Perlite



(a)



(b)

Figure 11.11 Alliage Cu-11,5 %Al : a) structure perlitique $\alpha + \gamma_2$ obtenue par refroidissement lent au four ; b) structure mixte perlite + martensite β' obtenue après refroidissement lent au four jusqu'à 540 °C, puis trempe à l'eau.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Autres alliages de Cu

- *Les cupro-nickels (Cu-Ni)*
 - 10 à 30 % Ni,
 - Meilleure résistance à la corrosion (effet de Ni),
 - Applications :
 - Industrie chimique,
 - Tubes d'eau de mer.

Cuprobéryllium Cu-Be

- **Peut être moulé, déformé à chaud ou écroui.**
- **Après durcissement structural,**
 - excellents R_m et R_e ,
 - anticorrosif,
 - résistant à l'usure si lubrifié.
- **Applications**
 - palliers et bagues des trains d'atterrissage des avions,
 - ressorts,
 - instruments chirurgicaux.
- **Chers, à cause du Be (1 % à 2.5 % massique)**
- **Problème de santé**

Tableau 11.7 Composition et propriétés mécaniques moyennes de quelques alliages de cuivre corroyés

Alliage	Désignation (CDA) ¹	Composition moyenne (%)	État ²	$R_{e0.2}$ ³ (MPa)	R_m ³ (MPa)	A^3 (%)	E^3 (GPa)	Conductivité thermique (W/m·K)	Conductivité électrique (%IACS) ⁴
Cuivre	—	Cu 99,9	O D	70 315	220 350	45 6	118 —	385 —	97 à 101 —
Laiton (Cu–Zn)	240	20 Zn	O	105	315	50	112	140	32
			D	410	515	7	—	—	—
	260	30 Zn	O	120	355	62	108	122	28
			D	440	530	8	—	—	—
	280	40 Zn	O	120	375	45	105	121	27
			½ D	350	490	15	—	—	—
	464	39,2 Zn–0,8 Sn	O	175	400	45	105	116	26
			½ D	390	550	20	—	—	—
Bronze (Cu–Sn)	521	8 Sn–0,2 P	O	165	420	63	112	62	13
			D	600	650	10	—	—	—
	524	10 Sn–0,2 P	O	210	450	65	112	50	11
Cu–Al			D	640	700	15	—	—	—
	614	7 Al–2 Fe	O	280	560	42	126	76	14
			D	370	610	35	—	—	—
Cu–Ni	624	11 Al–3 Fe	T.T.	600	750	12	—	—	—
	715	30 Ni	O	275	420	45	154	29	4,6
Cu–Zn–Ni			D	525	600	4	—	—	—
	770	27 Zn–18 Ni	O	190	420	40	126	29	5,5
Cu–Be			D	600	700	3	—	—	—
	172	1,9 Be–0,2 Co	O	210	500	48	119	60	18
			T.T.	1260	1420	2	—	—	—

1. Selon la Copper Development Association.

3. Mesurées sur produits plats.

2. O : recuit ; D : dur ; ½ D : demi-dur ; T.T. : après traitements thermiques.

4. 100 % IACS correspond à une résistivité de 1,7241 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 47

Session 11

Conductibilité du cuivre industriel

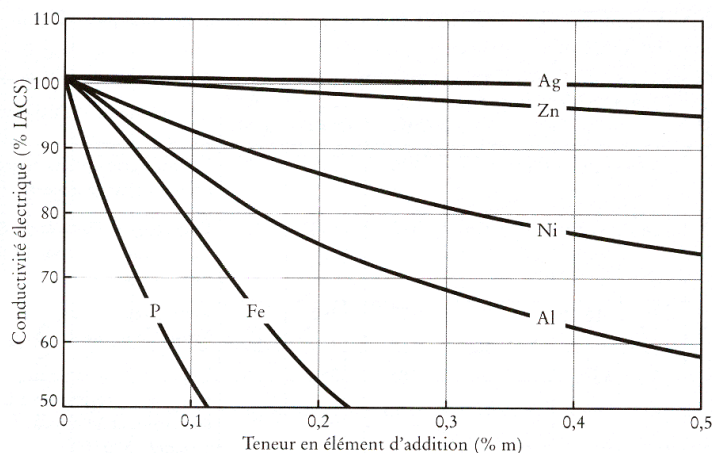


Figure 11.4 Influence des impuretés sur la conductibilité électrique du cuivre industriel. La conductivité est exprimée en % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

Morale de l'histoire : fabriquer les matériaux est un art !!!

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 48

Session 11

Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- **Alliages de Mg**
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Alliages de magnésium : Mg

Magnésium
Mg

- Masse volumique : 1.7 g/cm^3 (plus léger que Al : 2.7 g/cm^3)
- 2 X plus cher que l'aluminium

Alliages de Mg

- **Plus léger** (1.7 g/cm^3) que l'aluminium (2.7 g/cm^3);
- Utilisé en aéronautique et industrie spatiale;
- HC, trois plans de glissement, donc ductilité faible et difficile à mettre en œuvre par déformation plastique mais **bonne usinabilité**;
- Toutefois au dessus de 200°C , nouveaux plans de glissement et déformation plastique possible, **écrouissage à chaud**;
- Utilisés en fonderie et corroyage;
- Sensibles au **durcissement structural** si on ajoute des éléments (Al, Zn, Zr, Mn, Ag).
- **Corrosion**
 - **Très mauvaise tenue en corrosion marine**;
 - Résistent relativement bien à la corrosion atmosphérique.
- **Risque d'incendie lors de sa mise en forme**

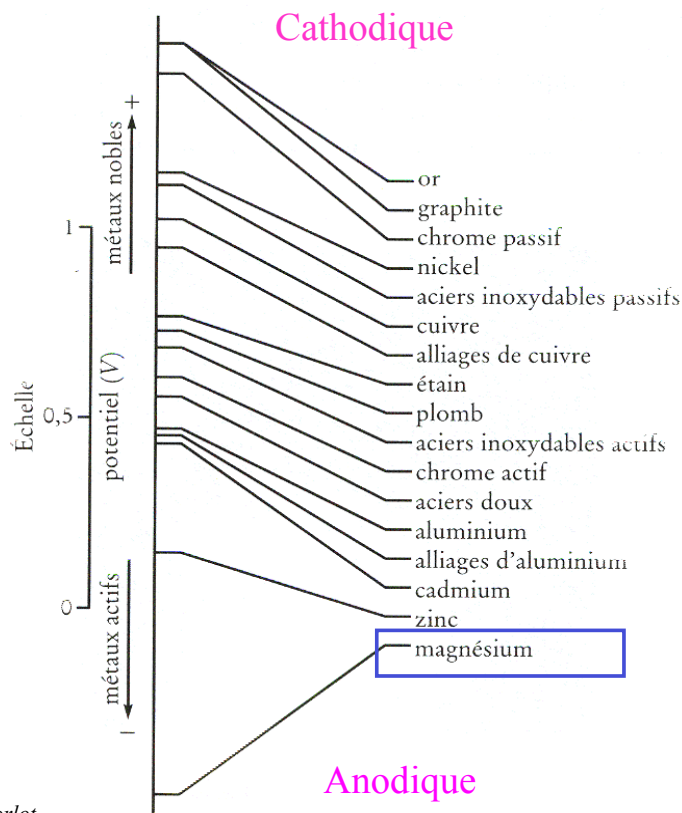
Le magnésium et ses alliages

*Caractéristiques et rigidités spécifiques d'aluminium
et de magnésium (Bailon, 2000; ASM, vol.16, 1999)*

Matériau	Masse volumique (t/m^3)	Module d'Young (Gpa)	Rigidité spécifique E/ρ	Température de fusion θ_f ($^\circ\text{C}$)	Coefficient de dilatation linéique α ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Aluminium	2.7	71	26.3	660	23.6
Magnésium	1.74	42	24.1	649	25.2

Potentiels de corrosion
des métaux dans l'eau
de mer
33 g/L de sel (NaCl)
pH = 8.2

Température : 25°C



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 53

Session 11

Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- **Alliages de Zn**
- Alliages de Ti
- Alliages réfractaires

Le zinc et ses alliages

- **Température de fusion basse :**
 - 420 °C (Zn non allié)
 - 380 °C (alliages de fonderie : Zn-Al-Mg, Zn-Al-Cu-Mg)
- Propriétés **mécaniques médiocres**,
- Zn sert surtout à la **galvanisation** et à la métallisation,
- **Bonne coulabilité** (Fonderie de pièces minces, précision).



MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 55

Alliages de zinc coulés

Tableau 11.10 Composition et propriétés mécaniques de quelques alliages de zinc coulés en coquille sous pression

Alliage	Composition moyenne (%)	$R_{e0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
AG40A (Zamac 3)	4 Al-0,04 Mg	260	280	8
AC41A (Zamac 5)	4 Al-1 Cu-0,04 Mg	310	320	5
ZA8	8 Al-1 Cu-0,02 Mg	285	375	8
ZA27	27 Al-2,2 Cu-0,01 Mg	370	425	3

Effets de Mg
Max 0.08 % Mg
R_m ↗
Coulabilité ↘
Tenacité ↘

- **Utilisation :** galvanisation des aciers (**50 % production de Zn**)
 - métallisation,
 - fabrication des peintures riches en zinc,
 - industries auto (pompe à essence, carburateurs),
 - électroménager (robinetterie, serrures).

Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- **Alliages de Ti**
- Alliages réfractaires

Le titane et ses alliages

- **Propriétés :**
 - Densité : 4.5 g/cm³,
 - Pt de fusion : 1800 °C.
- **Avantages :**
 - Très rigide,
 - Très bonne résistance mécanique,
 - Excellente résistance à la chaleur,
 - Inoxydable.
- **Désavantages :**
 - Cher,
 - Difficile à forger, usiner.
- **Utilisation :**
 - Aéronautique
 - Boulons et attaches,
 - Bras de transmission et support mobile,
 - Pièces destinées aux zones de température élevées.
 - **Utilisation comme biomatériaux !**

Rigidité spécifique (R_m/ρ) supérieure à celle des métaux

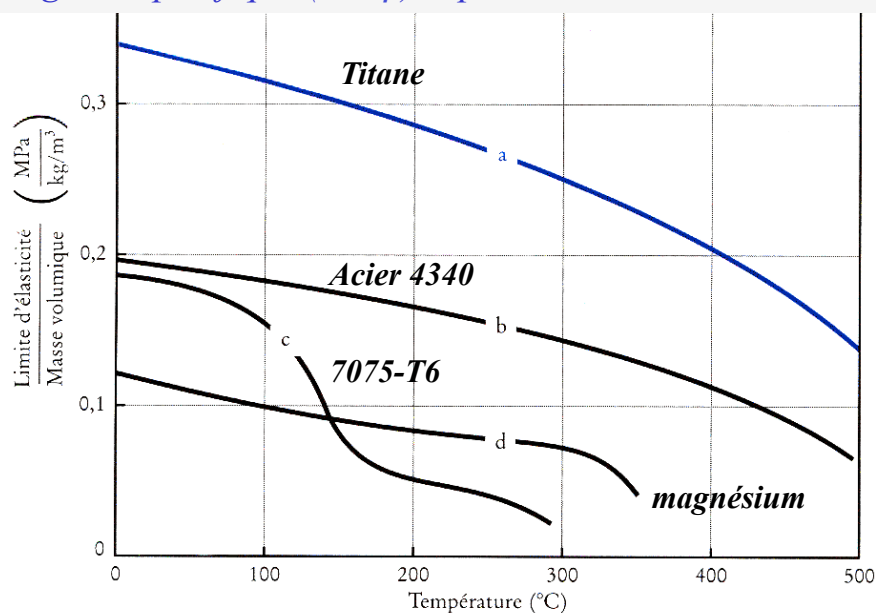


Figure 11.13 Comparaison entre les rapports limite d'élasticité/masse volumique, pour divers alliages : a) Ti-6 % Al-4 % V ; b) acier 4340 ; c) aluminium 7075-T6 ; d) magnésium HK31A.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Alliages non ferreux 59

Session 11

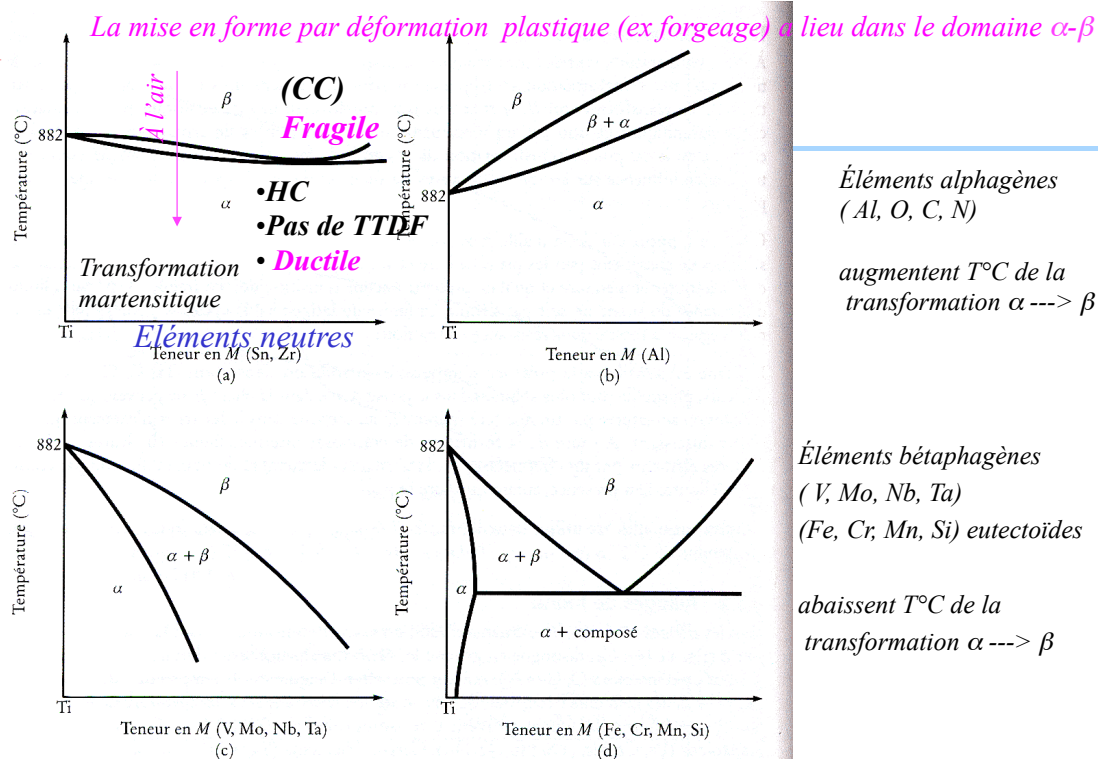


Figure 11.14 Influence des éléments d'alliages sur les transformations du titane : a) éléments neutres ; b) éléments alphas ; c) éléments bêta isomorphes ; d) éléments bêta eutectoïdes.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

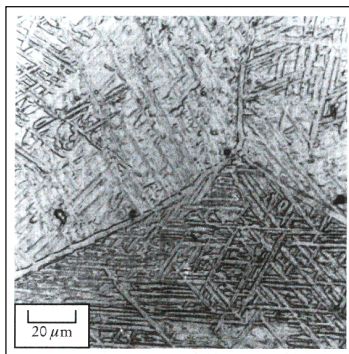
Session 11

Alliages de titane

- Alliages alpha (α) :
 - Résistent au fluage jusqu' à 650°C.
 - Résistent à l' oxidation jusqu' à 1100°C.
 - Peu déformables à froid.
 - Peu sensibles aux traitements thermiques.
 - Ductile à toute température : pas de TTDF.
- Alliages bêta (β) :
 - Se prêtent bien à la déformation.
 - TTDF = - 60°C
 - S' utilisent difficilement à chaud; instable vers 350°C.

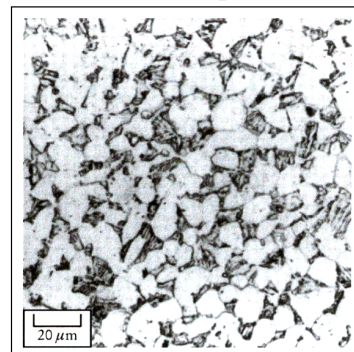
Microstructure

*Structure martensitique
aciculaire*



*Aiguilles \Leftrightarrow phase α
Matrice \Leftrightarrow phase β*

*Déformation plastique (domaine α - β)
+ traitement thermique
(925°C et trempe à l'air)*



*Grains équiaxes (α)
anciens grains β partiellement transformés*

Remarque

*Structure aciculaire + dure et résistante que équiaxe
mais moins ductile et tenace*

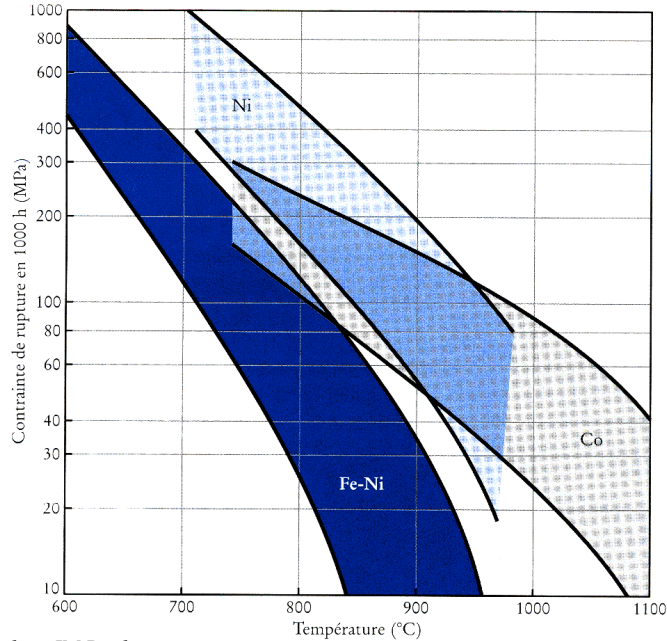
Métaux non ferreux

- Introduction
- Alliages d'aluminium
 - Corroyage
 - Fonderie
- Alliages de cuivre
 - Cuivre pur
 - Laitons
 - Bronzes
 - Autres alliages
- Alliages de Mg
- Alliages de Zn
- Alliages de Ti
- **Alliages réfractaires**

Les alliages réfractaires

- À base de fer et de nickel
 - Superalliages à base de nickel
 - Superalliages à base de cobalt
-
- *Pas de dégradation par oxydation*
 - *Bonnes propriétés mécaniques à haute température (700 à 1000 °C)*

Tenue en fluage (Temps, température, contrainte) des alliages réfractaires : Ni, Co, Fe-Ni



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Figure 11.17 Contrainte de rupture en 1000 h, en fonction de la température, pour les trois types d'alliages réfractaires.

MEC-200

Session 11

Utilisations

- Résistantes électriques chauffantes :
 - propriétés électriques,
 - résistance à l'oxydation.
- Soupapes d'échappement des moteurs (*oxydation, usure, déformation*); température d'utilisation de l'ordre de 750°C.
- Fours industriels et équipement thermiques (*résistance aux chocs thermiques*);
- Industries pétrochimiques (*résistance aux acides*);
- Centrales thermiques (*échangeurs de chaleur, turbines*);
- Industrie aéronautique : turbo-réacteurs ($T = 1100^{\circ}\text{C}$).

Résumé

- *Savoir comparer les différents alliages pour leurs différentes densités*
- *Savoir comparer les alliages quant à leurs couts et propriétés mécaniques*
- *Alliages d' aluminium (pour corroyage, pour fonderie). Certains alliages pour corroyage peuvent avoir leurs propriétés mécaniques améliorées par écrouissage (série 1000 Al 99%, 5000 Al-Mg) et d' autre par durcissement structurel (série 200 Al-Cu, 6000 Al-Si-Mg). Les alliages pour fonderie ont un eutectoïde.*
- *Alliages de cuivre (conducteur d'e). Cuivre pur, CuZn (laiton), CuSn (bronze), CuAl, CuNi, CuBe, CuZn,Ni*
- *Alliages de Magnesium, légers, chers*
- *Alliages de Zinc, bons pour fonderies, utilisés pour galvaniser.*
- *Alliages de Titane, Rigides, inoxydables, chers, Biomatériaux. Peuvent avoir leurs propriétés modifiées par l' addition d' éléments alpha et gamagènes.*